

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя  
д.т.н., професору Пастуху Олегу Анатолійовичу

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри комп'ютерних наук  
Західноукраїнського національного університету

Пукаса Андрія Васильовича

на дисертаційну роботу

Біщака Дмитра Сергійовича

на тему

«Методи та програмні засоби мультимодального аналізу когнітивно-моторних  
сигналів»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 12 «Інформаційні технології»

за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

### **1. Актуальність теми дослідження**

Дисертаційна робота Дмитра Біщака присвячена актуальній науково-прикладній задачі розробки методів та програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів для дослідження тремору та супутніх неврологічних порушень. Робота виконана за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення та поєднує задачі цифрової обробки сигналів, математичного моделювання, проектування програмної архітектури й створення інтегрованих програмних даних для медичного застосування.

Актуальність теми дослідження зумовлена зростанням потреби у впровадженні сучасних цифрових технологій у сферу нейродіагностики для підвищення точності, відтворюваності та інформативності оцінювання стану пацієнтів із неврологічними захворюваннями. У сучасній клінічній практиці аналіз тремору часто базується на візуальному спостереженні та суб'єктивних шкалах оцінювання, які характеризуються міжекспертною варіабельністю та не завжди дозволяють отримати кількісно обґрунтовані результати, особливо на ранніх стадіях захворювання.

У зв'язку з цим особливого значення набувають інформаційні технології, орієнтовані на синхронізований аналіз нейрофізіологічних і моторних даних, що дозволяють комплексно досліджувати взаємозв'язок між електрофізіологічною активністю мозку та моторними проявами тремору. Існуючі моноmodalні підходи не забезпечують повноцінного аналізу часової та функціональної взаємодії між EEG-сигналами і графомоторною активністю, що обмежує можливості об'єктивної цифрової діагностики.

Тематика дисертації відповідає сучасним напрямкам розвитку цифрової медицини, нейроінформатики та інженерії програмного забезпечення. Особливо актуальним є створення інтегрованих програмних систем, здатних забезпечити повний цикл роботи з мультимодальними даними – від збору та синхронізації сигналів до їх обробки, аналізу, візуалізації та інтеграції з медичними інформаційними системами. Розроблення модульних, відтворюваних і масштабованих програмних рішень для мультимодальної обробки когнітивно-моторних сигналів є важливим кроком до розвитку персоналізованої цифрової нейродіагностики, об'єктивного моніторингу ефективності лікування та підтримки клінічних рішень.

Отже, дисертаційна робота є актуальною, має важливе наукове та практичне значення і повністю відповідає сучасним тенденціям розвитку програмної інженерії та інформаційних технологій у медицині, зокрема.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, темами**

Дисертаційне дослідження безпосередньо пов'язане з науковою тематикою кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та виконане в межах досліджень, присвячених обробці складних сигналів, моделюванню когнітивно-моторних процесів і створенню програмних систем аналізу даних.

На кафедрі проводяться дослідження у сфері цифрового аналізу мимовільних рухів, тремору та інтеграції графомоторних і електроенцефалографічних (ЕЕГ) сигналів. У попередніх роботах науковців кафедри були запропоновані підходи до синхронізованого збору моторних та ЕЕГ-даних, їх цифрової обробки, спектрального аналізу та математичного моделювання когнітивного впливу на рухову активність. Представлена дисертаційна робота логічно продовжує та розвиває зазначений науковий напрям.

Тематика дисертації відповідає сучасним дослідженням у галузі інженерії програмного забезпечення для мультимодального аналізу біомедичних сигналів, формалізації діагностично значущих ознак та побудови програмних систем для обробки складних даних. Отримані результати узгоджуються з актуальними напрямками розвитку обчислювальної нейроінформатики, нейроінженерії та цифрової медицини, що передбачають інтеграцію сигналів різної природи й застосування сучасних методів їх аналізу.

Тема дисертаційної роботи повною мірою відповідає освітньо-науковій програмі «Інженерія програмного забезпечення» третього рівня вищої освіти Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

### 3. Основні наукові результати, одержані автором, їх новизна

Основні наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи були апробовані на міжнародних наукових конференціях та опубліковані у фахових наукових виданнях.

Основні наукові результати:

– **вперше** запропоновано архітектурний підхід до побудови програмних систем мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів, що базується на модульному розділенні процесів збору, синхронізації, обробки та аналізу даних і реалізований у вигляді програмного фреймворку, завдяки чому забезпечено відтворюваність експериментів, трасованість обчислень та масштабованість обчислювальних процесів;

– **вперше** розроблено модель взаємозв'язку між ЕЕГ-сигналами та графомоторною активністю (показником  $\Delta R$ ) як узагальнене представлення моторного сигналу, яка базується на крос-кореляційному аналізі з урахуванням часових зсувів, що дозволило кількісно оцінювати когнітивно-моторну взаємодію;

– **вперше** запропоновано інтегральну спектральну метрику – індекс синусоїдальності, що визначається на основі спектрального аналізу крос-кореляційних залежностей між ЕЕГ та  $\Delta R$ -сигналами, завдяки чому стало можливим кількісне оцінювання структурної організації тремору, рівня його сфокусованості та регулярності осциляцій;

– **набули подальшого розвитку** методи аналізу графомоторних та ЕЕГ-сигналів, які базуються на використанні спіральних траєкторій, показника радіального відхилення  $\Delta R$ , спектрального аналізу, шляхом їх узгодженого застосування в єдиному обчислювальному процесі, що дозволило підвищити інформативність оцінювання моторної активності та покращити ознаки для класифікації типів тремору;

– **дістали подальший розвиток** програмні засоби синхронізації, спектрального та кореляційного аналізу мультимодальних ЕЕГ і графомоторних даних, реалізованих у модульному програмному фреймворку для інтеграції аналітичних методів у межах єдиної програмної системи, що підвищило ефективність практичного застосування та забезпечило масштабованість обробки даних.

Таким чином, наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробленні нових моделей, метрик та програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів, що мають теоретичне та практичне значення для побудови сучасних систем цифрової діагностики тремору.

### 4. Короткий аналіз основного змісту дисертації

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, присвяченим розробленню методів та програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів для задач оцінювання та класифікації моторних порушень. Структура роботи є логічною, послідовною та відповідає поставленій меті й сформульованим завданням дослідження.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено використані методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Також подано відомості щодо апробації результатів та публікацій автора.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасних підходів і програмних систем мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів. Значну увагу приділено питанням синхронізації мультимодальних даних, уніфікації форматів, попередньої обробки ЕЕГ- та графомоторних сигналів, а також вимогам до побудови програмних систем аналізу таких даних. На основі проведеного аналізу сформульовано наукове завдання дослідження та обґрунтовано необхідність створення модульної програмної архітектури мультимодальної обробки сигналів.

У **другому розділі** наведено математичні моделі та методи аналізу мультимодальних сигналів. Автором формалізовано використання показника  $\Delta R$  як кількісної характеристики моторного порушення, розроблено методи крос-кореляційного аналізу між ЕЕГ- та графомоторними сигналами, а також запропоновано нову інтегральну метрику – індекс синусоїдальності. Розділ містить основний теоретичний внесок роботи та демонструє формалізований підхід до аналізу когнітивно-моторних взаємодій.

У **третьому розділі** представлено архітектуру програмної платформи мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів. Реалізовано модульний Python-фреймворк з API-орієнтованою архітектурою та підтримкою локального і хмарного розгортання. Важливою перевагою розділу є детальний розгляд інженерних аспектів побудови програмної системи, зокрема питань модульності, масштабованості, відтворюваності обчислень, повторного використання компонентів та інтеграції у прикладні інформаційні системи.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальної перевірки розроблених методів і програмних засобів на реальних мультимодальних даних. Проведено аналіз функціональних станів, валідацію запропонованих моделей та порівняння результатів із існуючими підходами. Отримані результати підтверджують ефективність використання крос-кореляційного аналізу та індексу синусоїдальності для кількісного оцінювання характеристик тремору.

У **додатках** наведено матеріали, що доповнюють основний зміст дисертації, зокрема структури та формати вхідних даних, описи реалізованих методів обробки сигналів, а також акти впровадження результатів дослідження. Наявність додатків підвищує практичну цінність роботи, підтверджує прикладний характер отриманих результатів та сприяє відтворюваності запропонованих програмних засобів.

У цілому зміст дисертаційної роботи є цілісним, достатньо обґрунтованим та відповідає поставленим завданням дослідження. Робота демонструє поєднання методів аналізу сигналів із сучасними підходами до побудови програмних систем, що відповідає спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

## **5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Сформульовані у дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації є достатньо обґрунтованими та логічно взаємопов'язаними. Достовірність отриманих результатів забезпечується комплексним використанням методів цифрової обробки сигналів, спектрального та крос-кореляційного аналізу, математичного моделювання і програмної реалізації запропонованих підходів.

Автором послідовно виконано перехід від аналізу сучасного стану проблеми та виявлення обмежень існуючих підходів до розроблення власних моделей, методів і програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів. Важливо, що теоретичні положення роботи підтверджуються результатами експериментальної перевірки на реальних анонімізованих даних синхронної реєстрації ЕЕГ - та графомоторних сигналів.

Обґрунтованість висновків підтверджується проведенням аналізом часових і спектральних характеристик сигналів, дослідженням кореляційних залежностей між ЕЕГ та  $\Delta R$ , а також оцінюванням змін функціонального стану пацієнтів у динаміці. Наукові положення дисертації узгоджуються зі змістом розділів роботи, поставленою метою та сформульованими завданнями дослідження, що свідчить про належний рівень методичної обґрунтованості отриманих результатів.

## **6. Практичне значення одержаних результатів**

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає у розробленні програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів, які можуть бути використані при створенні сучасних програмних систем аналізу біомедичних даних для оцінювання тремору та дослідження когнітивно-моторних взаємодій на основі синхронізованих ЕЕГ- і графомоторних сигналів.

У роботі реалізовано модульний програмний фреймворк, який забезпечує повний цикл обробки мультимодальних даних – від збору та синхронізації сигналів до їх аналізу, візуалізації та формування результатів дослідження. Запропоновані методи та програмні засоби дозволяють виконувати об'єктивний кількісний аналіз тремору, оцінювати зміни функціонального стану в динаміці, формалізувати когнітивно-моторні взаємозв'язки та забезпечувати автоматизований аналіз часових і спектральних характеристик сигналів.

Практичну цінність має також можливість інтеграції розроблених програмних модулів у телемедичні системи, системи дистанційного моніторингу та інші медичні інформаційні середовища, де важливими є стандартизованість, відтворюваність та масштабованість обробки даних. Запропонована програмна архітектура забезпечує можливість розширення функціональності системи шляхом додавання нових метрик, алгоритмів аналізу даних, ML-модулів та нових типів сенсорів без зміни базової логіки роботи системи.

Важливим практичним результатом є орієнтація розроблених програмних засобів на використання як у дослідницьких задачах аналізу біосигналів, так і в прикладних медичних інформаційних системах. Реалізовані програмні рішення

підтримують можливість хмарного розгортання та інтеграції з існуючими інформаційними платформами, що розширює сферу їх практичного застосування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у діяльність ТОВ «ФК Вітамін», а також в освітній та науково-дослідний процес Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського, зокрема при викладанні дисциплін, пов'язаних із медичною інформатикою, обробкою біосигналів та медичними інформаційними технологіями.

## **7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертаційна робота оформлена відповідно до встановлених вимог до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Структура роботи є логічною та послідовною і включає вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. У роботі висвітлено теоретичні аспекти предметної області, наведено результати розроблення методів та програмних засобів мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів, а також подано результати експериментальної перевірки запропонованих підходів.

Основні наукові положення та результати дисертаційного дослідження достатньо повно відображені у наукових публікаціях автора. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, зокрема 1 статтю у виданні, що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus, 3 статті у наукових фахових виданнях України категорії Б, 2 статті в журналах з інформаційних технологій та 4 публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Опубліковані праці охоплюють основні результати дисертаційної роботи та відображають ключові етапи проведеного дослідження.

Результати дисертації пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях, де обговорювалися питання цифрової обробки мультимодальних сигналів, аналізу когнітивно-моторних взаємодій та побудови програмних систем аналізу даних. Це свідчить про належний рівень наукової апробації отриманих результатів та їх відповідність сучасним напрямкам розвитку інформаційних технологій і цифрової медицини.

Аналіз дисертаційної роботи та опублікованих праць дає підстави вважати, що автором належним чином дотримано принципів академічної доброчесності. Використання наукових результатів, ідей та положень інших авторів супроводжується відповідними посиланнями на джерела. Ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження у роботі не виявлено.

## **8. Мова та стиль дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота викладена логічно, послідовно та на належному науковому рівні з використанням сучасної термінології у галузі інформаційних

технологій, цифрової обробки сигналів та медичної інформатики.

Тема, зміст та отримані наукові результати дисертаційної роботи відповідають спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

## 9. Зауваження до дисертації:

Позитивно оцінюючи науковий і методичний рівень дисертаційної роботи, її практичну спрямованість та актуальність отриманих результатів, слід відзначити комплексний підхід автора до поєднання методів аналізу сигналів із розробленням програмної архітектури мультимодальної системи. Разом з тим, робота має окремі дискусійні положення і зауваження:

1. Автором реалізовано модульний підхід до побудови програмної системи, проте аспекти автоматизованого тестування та перевірки узгодженості взаємодії між програмними компонентами розглянуто обмежено.

2. У роботі значну увагу приділено архітектурі програмного фреймворку мультимодального аналізу, однак питання оцінювання продуктивності системи при роботі з великими обсягами мультимодальних даних могли б бути висвітлені детальніше.

3. Перспективним виглядає запропонований API-орієнтований підхід до інтеграції аналітичних модулів, однак питання уніфікації форматів обміну даними та інтеграції із зовнішніми медичними системами могли б бути деталізовані ширше.

4. У роботі недостатньо уваги приділено питанням організації довготривалого зберігання мультимодальних даних та керування їх версіями у межах програмної системи.

5. Окремі теоретичні фрагменти дисертації містять перевантажені речення та повтори термінологічних конструкцій, що місцями ускладнює сприйняття матеріалу.

6. У формулі (2.14), за якою розраховують глобальний індекс SI для пацієнта, не зрозуміло чому кількість EEG-каналів рівна  $K$ , а сума обчислюється з  $N$  елементів.

7. Для відображення послідовності обробки та передачі даних у програмному фреймворку використано діаграму потоків даних, що відображена на рис. 3.14. Не зовсім зрозуміло для чого автор використовує функціональний підхід, якщо інші елементи проектування системи представлено діаграмами об'єктно-орієнтованого підходу.

8. У роботі лише частково розглянуто питання інформаційної безпеки та захисту медичних даних при інтеграції із зовнішніми медичними системами, що є важливим аспектом практичного використання подібних програмних рішень.

У роботі основну увагу приділено реалізації програмного фреймворку та аналітичних модулів мультимодального аналізу, тоді як аспекти побудови повноцінної прикладної медичної інформаційної системи для кінцевого користувача могли б бути висвітлені детальніше. Разом із тим представлена

інтеграція з OpenMRS підтверджує можливість практичного застосування запропонованих програмних засобів у медичних інформаційних середовищах.

Наведені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи та мають переважно рекомендаційний характер.

## 10. Висновок щодо дисертації в цілому

Дисертаційна робота Біщак Дмитра Сергійовича на тему «Методи та програмні засоби мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів» є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальну науково-прикладну задачу розроблення методів та програмних засобів мультимодального аналізу електроенцефалографічних і графомоторних даних для задач цифрової оцінки моторних порушень. Особливу цінність становить запропонований автором підхід до побудови модульної програмної архітектури та інтеграції аналітичних компонентів у межах єдиного програмного середовища.

За змістом, тематикою, методами дослідження та отриманими результатами дисертаційна робота відповідає спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології». Представлені у роботі результати узгоджуються з предметною областю освітньо-наукової програми «Інженерія програмного забезпечення» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та охоплюють питання проектування програмних систем, цифрової обробки даних, побудови програмної архітектури й реалізації інформаційних технологій аналізу складних сигналів.

Вважаю, що дисертаційна робота Біщак Дмитра Сергійовича «Методи та програмні засоби мультимодального аналізу когнітивно-моторних сигналів» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (із змінами) та Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення», галузь знань 12 «Інформаційні технології».

### Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Західноукраїнського національного університету



Андрій ПУКАС

Підпис *Андрія Пукаса*

Завіряю:

НАЧАЛЬНИК  
ЗАГАЛЬНОГО ВІДДІЛУ

*Алла Селенко (Селенко)*